

論文の内容の要旨

論文題目	磁束反射効果を用いた超伝導バルク磁石の磁場解析高精度化
学位申請者	土屋寛明

近年、超伝導バルク磁石の高携行性が注目され、その様々な開発が進められている。超伝導バルク磁石は永久磁石よりも高い磁場を持つため、永久磁石と置換される形での実用が期待されている。超伝導バルク磁石の磁場を有効に用いるためには、実用上の要求を満足する磁場を設計する必要があり、従来から様々な方法で超伝導バルク体の捕捉磁場分布が計算されてきた。

しかし、従来の超伝導バルク磁石の捕捉磁場計算では、要素機器設計の立場から許容不可能な計算誤差（最大20%程度）が生じている。計算誤差の一部は、従来手法がバルク端部での磁束反射効果を考慮していないことに由来している。近年磁束量子動力学以外にもギンツブルグ-ランダウ方程式で類似の効果が検証されていたが、実用上の磁場設計に用いられる捕捉磁場計算にどの程度の影響があるのかは議論されていなかった。本研究では、磁束反射効果を近似的に考慮した磁場計算コードを開発した上で、磁場測定結果と計算結果を比較し、最大計算誤差が20%程度から5%程度まで減少させることに成功した。

まず、捕捉磁場計算結果と比較する磁場測定結果を得るため、実験的にMg原料粉とB粉を乾式混合/プレス加工し、アルゴン雰囲気中で熱処理（850℃、3h）することで、多結晶MgB₂超伝導バルク体（バルク径:30mm バルク厚さ10mm）を2つ作製した（バルク1、バルク2とする）。バルク1は磁場測定用の試料であり、バルク1に着磁（FC法）を行うことで、バルク1の捕捉磁場分布を磁場測定結果として得た。一方、バルク2は2×1×1 mm³の小片に切り出し、SQUIDを用いてバルク内部電流の外部磁場応答特性を示すJ_c-B特性を求めた。測定によって得られたJ_c-B特性は離散値であるため、チェビシェフ補間を用いてJ_c-B特性を磁場計算に使用可能な連続データに補間した。次に補間したJ_c-B特性とビオ・サバルの法則を用いて、従来研究と磁束反射効果を考慮した計算模型全6種を構築し、超伝導バルク磁石の磁場分布を算出した。

次に、バルク 1 の磁場測定結果と捕捉磁場計算結果を比較することで、磁場分布への磁束反射効果の影響を確認した。

本研究の捕捉磁場の計算精度は、従来研究より最低でも約9%向上した。また、最も磁束反射効果を考慮した模型(Y20模型)での磁場計算精度は、磁束反射効果を考慮していない模型(Y1模型)から平均1.7%精度向上した。

バルク磁石の磁場計算結果と磁場測定結果の差は、バルク表面中央上3 mmで0.1T以下となり、0.25Tもの計算誤差を生じた従来研究と比較して、計算誤差は大きく軽減された。また、各計算模型での電流密度分布では、磁束反射効果の導入により微量ながらバルク端部に集中する傾向が見られた。

次に、磁場測定点とバルク内部電流の距離的相関から磁場計算精度向上で考慮すべき電流位置を確認するため、開発手法を用いてバルク表面中央上3mm、8mmの磁場に対するバルク内部電流の寄与率を算出した。寄与率の径方向依存性によりバルク表面中央上3mmの磁場計算結果には、中央から端部へ5mmずれた位置の表面電流が最も影響を及ぼした。その一方、バルク表面中央上8mmの磁場計算結果には、中央から端部の表面電流が最も影響を及ぼすことが分かった。磁束反射効果による計算精度は、バルク表面上3 mmの磁場値より8 mmの磁場値に対して向上した。磁束反射効果によるバルク遠方磁場への精度向上効果は、バルク端部電流がより遠方の磁場値に対して寄与する傾向に一致する。

最後に、磁束反射効果による磁場値上昇がどの電流の寄与により生じたものかを定量的に確認するため、バルク表面中央上3mm、8mmの磁場に対して、Y20模型を用いて磁場内部電流の寄与率空間分布を確認した。Y20模型での磁束反射効果によりバルク最端部の電流は、測定点を問わず磁場値へ2%程寄与していることが分かった。Y1模型からY20模型への精度向上効果は約1.7%だったことから、計算精度向上の要因となった電流は、磁束反射効果によりバルク端部に集中していると考えられる。また、Y20模型で磁場寄与率を評価することで、従来研究と比較して最適化されたバルク内部の電流分布を考慮出来るため、バルク表面中央上3mm、8mmの磁場に対して、Y20模型を用いた磁場寄与率分布を算出した。Y20模型を用いた磁場寄与率の計算結果から①バルク表面電流による磁場値への影響が12%程であること、②バルク最下部の内部電流は約2%程磁場値へ寄与していることの二点が判明しており、従来計算より正確なバルク形状への設計指針が与えられると考える。

以上の検証結果から、磁束反射効果の導入により、超伝導バルク磁石の計算精度は大きく向上し、より高精度の磁場設計が可能となる。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 土屋寛明

審査委員主査 伏屋雄紀

委員 斎藤弘樹

委員 佐々木成朗

委員 島田宏

委員 村中隆弘

委員

委員

第一章は序論とし、本論文の主題である超伝導現象と、磁場発生装置として超伝導バルク磁石の位置付けを踏まえ、従来計算手法の問題点と論文の意義について述べている。申請者の着眼する問題点は、次の通りである。従来磁場計算で用いられている計算モデルでは、本来考慮されるべき磁束反射効果が考慮されていない。従来モデルを用いた計算では、実用上複数のバルクを用いた際には、バルク同士の磁氣的相関から測定磁場が設計上の想定磁場値と異なった値が出ることが予想される。この状況を打破するためには、実験的に超伝導バルク磁石の磁場値を測定し、磁束反射効果による影響を検証することが必要である。この着眼点に基づき、次章以降で申請者の具体的な研究内容が順を追って説明されている。

第二章では、研究手法（静磁界解析と実験的なバルク作製および磁場測定方法）の解説にあてられている。研究手法は、理論と実験に分けて述べられている。磁束反射効果の導入目的を述べた後、理論的に古典的なビオ・サバールの法則の式展開から磁束反射効果の導入方法を述べ、FC法による着磁と拡張ビーンモデルを用いた J_c - B 特性の算出方法を述べている。その後、実験的な超伝導バルク作製法と磁場測定方法を述べ、 J_c - B 特性の測定方法と磁場計算導入方法を述べている。

第三章では、超伝導バルク磁石の磁場測定結果と磁場計算結果を述べている。測定結果としては、超伝導バルクの磁場測定結果と算出した J_c - B 特性を述べている。 J_c - B 特性を用いた磁場計算結果を述べ、測定結果と計算結果の比較から磁束反射効果を最も考慮したモデルで、磁場計算での最大誤差は従来の21%から5%まで軽減されるという結果を得た。

第四章では、実験結果と計算結果の比較を踏まえ、測定試料の品質と計算の妥当性を述べている。測定試料の品質として、測定試料の粒径とコネクティビティを議論しており、粒径とコネクティビティ共に問題ないとの結論を得ている。計算の妥当性としては、磁束反射効果のバルク厚依存性の必要性和計算時に生じた振動解への対処方法を述べている。

第五章では、本論文の総括と将来的な研究の展望を述べている。

よって本論文は、博士（工学）の学位論文としての価値を有するものと認める。